



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Cracking location prediction and tensile strength estimation of UHPFRC based on deep learning
Author(s)	LUO, Xin
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第16621号
Issue Date	2025-09-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k16621
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/98231
Type	doctoral thesis
File Information	Xin_Luo_review.pdf, 審査の要旨 https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/



学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称 博士 (工学) 氏名 LUO Xin

審査担当者 主 査 教 授 松本 高志
 副 査 教 授 杉山 隆文
 副 査 教 授 宮森 保紀
 副 査 准教授 高橋 翔

学位論文題名

Cracking location prediction and tensile strength estimation of UHPFRC based on deep learning
(深層学習に基づく UHPFRC のひび割れ位置予測および引張強度推定)

超高性能繊維補強コンクリート (UHPFRC) は、高い圧縮強度と引張強度、高耐久性、ひび割れ抵抗性の向上などの優れた力学的特性により近年注目を集めており、重要なインフラ構造物の部材に広く適用されている。これらの特性は、マトリックスの緻密な微細構造と高強度鋼繊維の含有によるものである。

しかし、UHPFRC の性能は、マトリックス内の繊維の位置と配向の分布特性に大きく依存する。練り混ぜと打設中の流動により、繊維の欠損、集塊、卓越的な配向が生じ、ひび割れが発生しやすい弱部が形成される可能性がある。繊維分散の不均一性は、同一の配合設計と打設手順を有する試験体間であっても、一貫した力学的性能を確保することが困難となり、構造性能の信頼性を低下させる。したがって、繊維の分散を改善し、力学的特性への影響を理解することが、依然として主要な課題となっている。

既往の研究では、X 線 CT、磁気センシング、画像解析などの非破壊技術を用いて、内部の繊維分布特性を定量化してきたが、実構造部材における評価に必要な予測能力が十分であるとはいえない。さらに、従来の強度推定モデルは破断後の分析に依存しており、リアルタイムあるいは破断前の評価には限界がある。一方、近年の高解像度画像技術および人工知能の進展により、UHPFRC の内部構造を効果的に分析することが可能となった。X 線 CT 画像解析と深層学習の組み合わせにより、破断を伴わずにひび割れの挙動や引張性能を予測することが可能であると考えられる。

本研究の目的は、X 線 CT 画像解析と深層学習技術を統合することにより、UHPFRC のひび割れ発生位置の予測および引張強度の推定を行う統一的かつ非破壊的な体系を確立することである。具体的には、引張荷重および曲げ荷重の条件下において、潜在的なひび割れ発生位置を予測する深層学習モデルを開発し、予測されたひび割れ発生位置から抽出された局所的な繊維分布特性と効率係数に基づいて引張強度を推定する手順を示している。

本論文は全 7 章から構成されており、各章の内容は以下のとおりである。

第 1 章では、研究の背景をまとめており、研究の目的・範囲を示している。

第 2 章では、四点曲げ試験について述べている。材料、試験体の形状寸法、打設手順、および試験装置について説明し、X 線 CT 画像の三次元再構築を用いて実際のひび割れ位置を特定し、曲げ強度値の結果を示している。このデータセットを、後述の章で導入される深層学習モデルの検証の土台としている。

第3章では、曲げ荷重下におけるひび割れ位置予測に深層学習を適用する手法について述べている。YOLOv8を用いた繊維欠損領域の検出手法を提案し、その性能を統計的に検証している。さらに精度を向上させるため、Deformable ConvolutionとCoordinate Attentionを組み込んだ改良版YOLOv8-DCを提案している。本章では、学習プロセスと予測精度評価の詳細を述べ、ひび割れ位置予測の精度が明確に向上したことを示している。

第4章では、4種の異なる打設方法により製作したドッグボーン形状試験体による一軸引張試験について述べている。打設が繊維分布に与える影響、およびそれがひび割れの発生位置、破断モード、引張強度に及ぼす影響について体系的に分析している。また、ゲージ長あたりの繊維数と、ひずみ硬化あるいは軟化挙動の発生との関係性を明らかにし、引張ひび割れ予測の土台としている。

第5章では、一軸引張荷重下へとひび割れ位置予測手法を展開している。軽量かつ高精度な検出モデルYOLOv11を導入し、ひび割れ位置単一予測およびひび割れ経路区分予測の双方を実装している。後者では試験体を左・中央・右の三領域に区分することで、蛇行するひび割れ挙動を捉えている。また、ラベル付けと評価のためにデジタル画像相関解析の結果と統合して、予測の信頼性を向上させている。

第6章では、引張強度を推定する方法を提案している。予測されたひび割れ発生位置のX線CT画像を利用して、マイクロメカニクス手法により繊維の配向と効率に関する二つのパラメータを計算している。これを理論式による引張強度の推定値と比較している。正確なひび割れ発生位置の予測が、強度推定の精度を大幅に向上させることを示しており、特にひずみ硬化型の試験体においてその効果が顕著であることが確認している。

最後に第7章では、本研究の結論として得られた知見と結論をまとめ、今後の課題を示している。

これを要するに、著者は、UHPFRCのひび割れ発生位置の予測および引張強度の推定を行う非破壊的な方法を、X線CT画像解析と深層学習技術を統合することにより構築して、予測と推定の精度向上に関する知見を得たものであり、複合材料工学、構造工学に貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。